

Evaluación de la esorrentía anual obtenida a partir de fórmulas climatológicas y modelos regionales de clima

D. González-Zeas¹, A. Sordo¹, L. Garrote¹, A. Iglesias²

(1) Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética, Universidad Politécnica de Madrid, (2) Departamento de Economía Agraria y Ciencias Sociales, Universidad Politécnica de Madrid

dunia.gonzalez.zeas@alumnos.upm.es

Resumen

En regiones en las que no se dispone de un modelo hidrológico correctamente calibrado para estimar la esorrentía, se puede recurrir a la utilización de la esorrentía directa simulada por los modelos climáticos o a la esorrentía calculada a partir de fórmulas climatológicas que emplean variables climáticas básicas como la precipitación, temperatura y radiación solar, simuladas por los modelos regionales de clima (MRC).

El presente trabajo compara el comportamiento de la esorrentía directa obtenida por 10 simulaciones de los MRC del proyecto europeo PRUDENCE y la esorrentía media anual calculada a partir de la aplicación de cinco fórmulas climatológicas (Schreiber, Ol'dekop, Budyko, Turc-Pike, Zhang et al.) basadas en el índice de aridez, definido por la relación entre la evapotranspiración potencial y la precipitación. Series temporales mensuales de esorrentía, precipitación, temperatura y radiación solar son generadas a partir de las simulaciones de los MRC en 338 cuencas de España que cubren la totalidad del territorio peninsular, bajo condiciones de clima actual (periodo 1961-1990). La evapotranspiración potencial se obtiene usando el método presentado por Hargreaves. Estas formas funcionales estiman la relación entre la evapotranspiración actual y la precipitación y a través de un balance hídrico se calculan los valores de esorrentía anual. El comportamiento general de las variables climáticas simuladas por los MRC se caracteriza por presentar menor sesgo para precipitación y temperatura que para esorrentía. Empleando estadísticos de comparación se analiza la capacidad que tiene la esorrentía directa y la esorrentía anual calculada a partir de las fórmulas climáticas para reproducir los valores observados de esorrentía natural estimada por el modelo hidrológico distribuido SIMPA en las cuencas españolas.

En total se generaron 10 series mensuales de esorrentía directa y 50 series de esorrentía anual basadas en el índice de aridez (cada fórmula climática aplicada a las 10 simulaciones de los MRC). Los resultados muestran que la fórmula de Schreiber produce la mejor aproximación a los valores observados y por tanto minimiza el sesgo predominante en la variable esorrentía.

Adicionalmente, estos resultados se validan con las capas de esorrentía media anual de alta resolución proporcionada por la UNH/GRDC (University of New Hampshire/Global Runoff Data Centre) que preservan la exactitud de las medidas de las aportaciones observadas en las principales estaciones hidrológicas de todo el mundo, y que en la actualidad es el “mejor estimador” de la esorrentía terrestre sobre grandes extensiones. En este caso, los resultados muestran también que la fórmula de Schreiber estima mejor los valores de esorrentía anual que la esorrentía directa simulada por MRC.

1 Introducción

El calentamiento global debido al incremento de los gases de efecto invernadero tendrá un efecto significativo en el ciclo hidrológico (IPCC, 2001). Esto ha generado la necesidad de entender el comportamiento y la interacción de los sistemas a escala regional, continental y global, a través del uso de modelos climáticos. Las proyecciones climáticas advierten un incremento de fenómenos extremos durante el presente siglo (IPCC, 2007). El ciclo hidrológico se verá intensificado con mayor evaporación y precipitación, pero la precipitación adicional estará distribuida de una manera desigual alrededor del globo (Zhang et al., 2007).

Particularmente, el cambio climático tendrá efectos importantes sobre los recursos de agua a escala regional (Menzel y Burger, 2002; Muzik, 2002), por lo que resulta fundamental llevar a cabo un adecuado manejo, gestión y planificación de los mismos. La necesidad de incorporar los recursos de agua, dentro de los modelos de

evaluación global y regional, para determinar los impactos del cambio global, constituye en la actualidad un aspecto de gran importancia. Existen modelos hidrológicos que permiten estimar los valores de escorrentía actual a escala de grandes extensiones, a partir de las variables precipitación y temperatura simuladas por los modelos regionales de clima (MRC). Entre ellos podemos mencionar, el modelo de Yates (1997), WBM (Water Balance Model) de Vörösmarty et al. (1998), WaterGAP (Water-Global Assessment and Prognosis) (Döll et al. 1999) y SIMPA (Sistema Integrado de Modelización Precipitación Aportación) (Estrela et al. 1998). Sin embargo, debido a la limitada disponibilidad de datos, y a la falta de un modelo hidrológico correctamente calibrado, muchas veces resulta dificultoso disponer de series de escorrentía representativas de la situación actual para introducir las dentro de los modelos de gestión (Yates, 1997), y en base a las cuales se puedan construir series de diseño que nos permitan evaluar el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad del agua.

Ante esta situación, es indispensable analizar diversas alternativas que nos ayuden a obtener series de diseño representativas del comportamiento real. La utilización de las series de escorrentía directa simuladas por los MRC o las series de escorrentía media anuales calculadas a partir de fórmulas climatológicas basadas en el índice de aridez son opciones que se consideran en el presente estudio. El control de la energía disponible y la precipitación en la determinación de las tasas de evapotranspiración actual para el cálculo de la escorrentía ha sido destacado en numerosos estudios. Arora, 2002 ha utilizado satisfactoriamente las fórmulas propuestas por Schreiber, Ol'dekop, Budyko, Turc-Pike y Zhang et al., para expresar la evapotranspiración actual como una función del índice de aridez. La variable escorrentía juega un papel importante en el estudio de los sistemas hidráulicos, sin embargo, las incertidumbres asociadas a las proyecciones climáticas determina la existencia de una desviación, especialmente en la escorrentía (González-Zeas, D., 2010).

En estudio se evalúa la escorrentía directa obtenida de las simulaciones de lo MRC del proyecto europeo PRUDENCE (2001), y la escorrentía calculada a partir de cinco fórmulas climáticas basadas en el índice de aridez (Arora, 2002) en 338 cuencas que cubren la totalidad del territorio español, con el fin de determinar la alternativa que produce la mejor aproximación a los valores observados. Los resultados se comparan con la escorrentía natural estimada por el modelo hidrológico SIMPA (Sistema Integrado de Modelización Precipitación Aportación) (Estrela et al., 1996) que está calibrado en la totalidad del territorio español (denominado en este estudio datos observados) y con la escorrentía proporcionada por la UNH/GRDC que en la actualidad es el “mejor estimador” a escala global de la escorrentía terrestre sobre grandes extensiones (Fekete et al., 2000).

2 Área de estudio y datos

El área en estudio es el territorio continental de España, que tiene un área de 504782 km². La Figura 1 muestra las 338 subcuencas elementales definidas a partir de los puntos de la red fluvial que son relevantes para la gestión de los recursos hídricos (CEDEX, 1998). El estudio se realiza sobre las cuencas que se obtienen por acumulación de todas las subcuencas situadas aguas arriba del punto considerado y se las ha agrupado considerando las 14 Demarcaciones Hidrográficas de España.

Las cuencas de estudio se caracterizan por presentar un amplio rango de variabilidad en su tamaño, siendo la mayor área 84923.85 km² (cuenca del Río Ebro) y la de menor tamaño con un área de 15.89 km² (en la cuenca del Norte I). El tamaño promedio y coeficiente de variación promedio de las cuencas de estudio es de 4358.13 km² y 1.89 respectivamente.

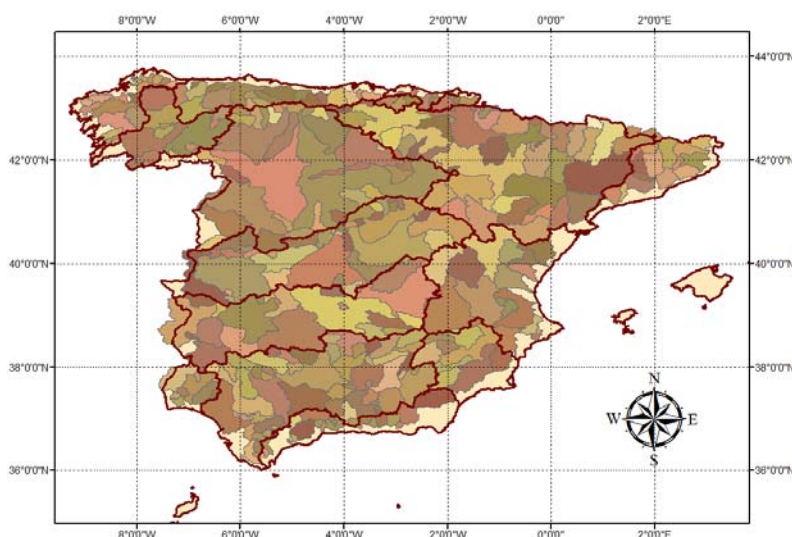
El modelo hidrológico SIMPA permite obtener las series de aportaciones en régimen natural en una cuadrícula de 1 km² de resolución para el periodo 1940/41 – 1995/96. Para comparación con los resultados de los modelos climáticos se han tomado las series de escorrentía mensual generadas por el modelo SIMPA para el periodo 1961 - 1990 en cada una de las 338 cuencas de estudio.

En lo que respecta a los modelos climáticos, se han utilizado las 10 simulaciones en situación de clima actual (periodo de control 1961-1990) realizadas por 8 MRC del proyecto europeo PRUDENCE (2001). Los MRC proporcionan información relativa a un gran número de variables (temperatura, precipitación, escorrentía, evaporación y radiación solar, entre otras) con resolución temporal diaria, mensual y estacional. El proyecto PRUDENCE proporciona los valores de las variables climáticas simuladas en la cuadrícula de coordenadas originales de cada modelo (O), con una resolución espacial que varía de 25 a 50 km dependiendo del modelo, y en una cuadrícula común con una resolución espacial de 0.5x0.5° (celdas de unos 50 km de lado), denominada coordenadas CRU (Climate Research Unit).

Se utiliza también como referencia de comparación, la escorrentía proporcionada por la UNH/GRDC (University of New Hampshire/Global Runoff Data Centre) que proporciona capas de escorrentía media anual y mensual de

alta resolución que preservan la exactitud de las medidas de las aportaciones observadas en las principales estaciones hidrológicas de todo el mundo (Fekete et al., 2000).

Figura 1 Cuencas elementales del estudio. El estudio se realizó sobre las cuencas acumuladas, incluyendo todas las subcuencas aguas arriba del punto considerado.



3 Metodología

La metodología empleada consiste básicamente en lo siguiente: 1) cálculo de la escorrentía media anual en las 338 cuencas elementales empleando las 10 simulaciones de los MRC y las cinco fórmulas climatológicas basadas en el índice de aridez, 2) determinación de los valores de escorrentía en las cuencas de estudio, por acumulación de las cuencas situadas aguas arriba del punto considerado, 3) comparación de las alternativas empleando estadísticos de bondad de ajuste de las series simuladas con respecto a las series observadas y a la UNH/GRDC y 4) determinación de la alternativa que más se aproxima a los valores observados y a los valores de referencia.

3.1 Uso del índice de aridez para calcular la escorrentía media anual

El índice de aridez (ϕ), definido por la relación entre la evapotranspiración potencial y la precipitación (ETP/P), es un parámetro hidroclimático muy útil para estimar la escorrentía media anual a gran escala (Arora, 2002). Para una región dada, la evapotranspiración anual (ET) y la escorrentía se rigen principalmente por la evapotranspiración potencial (ETP) y la precipitación. Si la ETP es muy baja, luego para una cantidad dada de precipitación, es probable que la escorrentía exceda la evaporación. De igual manera, la escorrentía puede ser una fracción muy pequeña de la precipitación si la evaporación es muy alta. La ETP se acerca a la precipitación, en regiones donde la energía disponible excede la cantidad requerida para evaporar la precipitación anual. Inversamente en regiones donde la energía disponible es una fracción de la necesaria para evaporar toda la precipitación anual, la evapotranspiración anual se acerca a la evapotranspiración potencial.

La relación de evaporación (ET/P), es expresada como una función del índice de aridez. Diferentes funciones han sido desarrolladas en el siglo pasado. Así tenemos, la fórmula de Schreiber (1904) que desarrolló una simple fórmula exponencial Eq. (1):

$$\frac{ET}{P} = 1 - e^{-\phi} \quad (1)$$

Ol'dekop (1911) desarrolló una relación de tangente hiperbólica Eq. (2):

$$\frac{ET}{P} = \phi \tanh\left(\frac{1}{\phi}\right) \quad (2)$$

Budyko (1948) propuso una ecuación basada en la media geométrica de las fórmulas de Schreiber y Ol'dekop, Eq. (3):

$$\frac{ET}{P} = \left[\phi \tanh\left(\frac{1}{\phi}\right) (1 - e^{-\phi}) \right]^{1/2} \quad (3)$$

Turc (1954)-Pike (1964), propusieron la siguiente función Eq.(4):

$$\frac{ET}{P} = \frac{1}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{1}{\phi}\right)^2}} \quad (4)$$

Todas las ecuaciones arriba mencionadas asumen que la relación de evaporación está controlada principalmente por las condiciones climáticas y no toman explícitamente en cuenta el efecto de vegetación. El único efecto de vegetación considerado en la evapotranspiración es a través de la influencia del albedo y la radiación neta.

Para superar esta limitación, Zhang et al. (2001) desarrolló una nueva fórmula que toma en consideración la importancia hidrológica del sistema de raíces Eq. (5):

$$\frac{ET}{P} = \frac{1 + w\phi}{1 + w\phi + \frac{1}{\phi}} \quad (5)$$

Donde w es un coeficiente que depende del tipo de planta. Está demostrado que la ecuación 5 provee el mejor ajuste a las otras cuatro ecuaciones cuando $w=1$ (Arora, 2002).

Partiendo de las relaciones de evaporación, se calcula la escorrentía media anual (R), mediante un balance de agua Eq. (6):

$$R = P - ET - \Delta S \quad (6)$$

Asumiendo que ΔS (cambio en la humedad del suelo) es muy pequeño, y por tanto despreciable a una escala de tiempo anual, se despeja la evapotranspiración actual (ET) en cada una de las formas funcionales (ecuaciones 1 a 5) y se reemplaza en la Eq.(6); así se obtiene el valor de la escorrentía media anual como una función del índice de aridez, Eq. (7), donde $F(\phi)$ corresponde a cada una de las cinco formas funcionales empleadas en este estudio.

$$R = P(1 - F(\phi)) \quad (7)$$

Para el cálculo de la ETP se utiliza el método de Hargreaves (Allen et al., 1998), expresado en la Eq. (8).

$$ETP = 0.0023 * (T_{med} + 17.8) * (T_{max} - T_{min})^{0.5} R_A \quad (8)$$

Donde:

ETP = evapotranspiración potencial (mm)

RA = radiación solar en la parte superior de la atmósfera (W/m²)

Tmed = temperatura media (°C)

Tmax = temperatura máxima (°C)

Tmin = temperatura mínima (°C)

La información de la precipitación, temperatura y radiación solar se obtiene de las salidas de las 10 simulaciones de los MRC del PRUDENCE. En consecuencia, para cada una de las cinco formas funcionales del índice de aridez se generan 10 series de escorrentía media anual.

3.2 Series de escorrentía media anual acumuladas

Se realiza un análisis topológico de las cuencas elementales. Los valores de escorrentía se acumulan tomando en consideración las subcuencas situadas aguas arriba del punto considerado y se las agrupa en las 14 Demarcaciones Hidrográficas de España. Al final se tiene un total de 338 cuencas acumuladas, 14 de las cuales se corresponden con el área de la Demarcación Hidrográfica a la que pertenecen.

3.3 Indicadores de bondad de ajuste

Los valores de escorrentía media anual observada y simulada por las diferentes alternativas se comparan utilizando el error medio normalizado (sesgo) y el índice de ajuste.

El error medio normalizado expresa la desviación en los valores medios simulados y observados para el conjunto de las 338 cuencas acumuladas, y por tanto, nos proporciona información sobre la tendencia a sobreestimar o subestimar la variable y nos cuantifica el error sistemático en las simulaciones (Janssen 1995). El error medio se normaliza por la media de los valores observados, Eq. (9).

$$Sesgo = \frac{\bar{S} - \bar{O}}{\bar{O}} \quad (9)$$

Donde \bar{S} y \bar{O} representan la escorrentía media simulada y observada del conjunto de las 338 cuencas estudiadas.

Con el fin de obtener una mejor medida de la capacidad de ajuste de las simulaciones, también se determinó el índice de ajuste (d), el cual es ampliamente discutido en Willmont (1982), Eq. (10), es una medida del error relativo medio obtenido por la normalización del error cuadrático medio con respecto al error potencial (suma del valor absoluto de la diferencia entre las simulaciones y la media de las observaciones y las observaciones y la media de las observaciones). Es una medida adimensional la cual puede ser aplicada con el fin de hacer comparación entre modelos (Willmott, 1982) y cuyos valores varía entre 0 (indica que no existe un buen ajuste) y 1 (indica un ajuste perfecto).

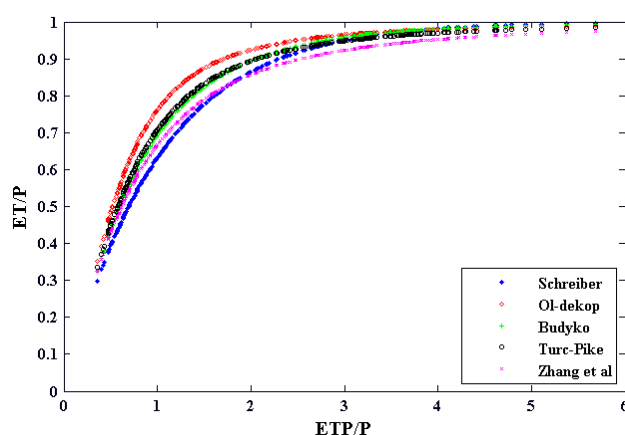
$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (|Si - \bar{O}| + |Oi - \bar{O}|)^2} \quad (10)$$

Donde Si representa la escorrentía simulada en la cuenca i , Oi la escorrentía observada en la cuenca i , \bar{O} la escorrentía media observada y n el número de cuencas estudiadas.

4 Resultados

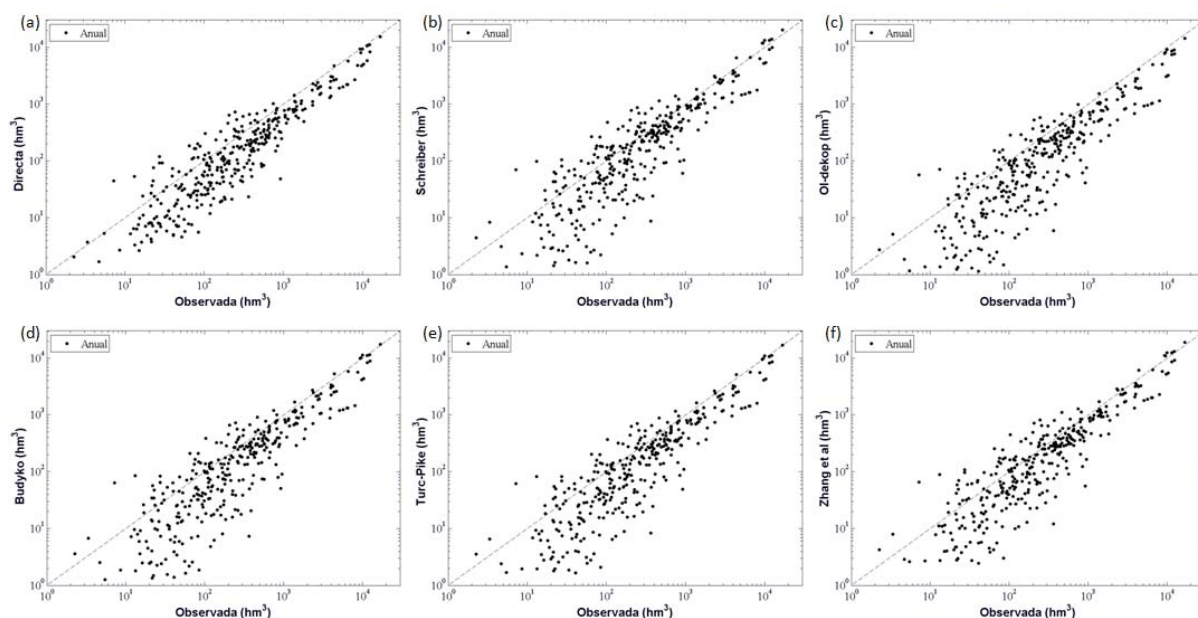
A partir de las series mensuales de precipitación, temperatura y radiación solar de las 10 simulaciones de los MRC se determinaron la evapotranspiración potencial (ETP) y la evapotranspiración actual (ET). La ETP se obtuvo utilizando el método de Hargreaves y la ET, a partir de la relación de evaporación expresada como una función del índice de aridez en sus cinco formas funcionales: Schreiber, Ol'dekop, Budyko, Turc-Pike y Zhang et al. La Figura 2 muestra la relación de evaporación como una función del índice de aridez para las 338 cuencas de estudio. En base a estas relaciones empíricas basadas en las condiciones climáticas se obtienen valores aproximados de la evapotranspiración actual, que mediante un balance hídrico nos permiten calcular los valores de escorrentía media anual. Se obtuvieron un total de 50 valores (10 por cada forma funcional). Como ejemplo, en la Figura 2 se muestra las curvas para el modelo UCM. Las cinco formas funcionales se comportan numéricamente de una manera similar y la relación de evaporación se aproxima asintóticamente a la unidad para valores muy altos del índice de aridez. Las curvas de Budyko y Turc-Pike apenas son distinguibles una de otra, Schreiber y Zhang et al. están por debajo del resto de curvas y se entrecruzan para valores del índice de aridez del orden de 2 y Ol'dekop se pierde sobre el resto de curvas para valores del índice de aridez alrededor de 3. Resultados similares se obtuvieron con el resto de MRC.

Figura 2 Modelo UCM. Comparación entre las diferentes formas funcionales. Índice de aridez versus relación de evaporación.



La Figura 3 muestra el contraste con respecto a los valores observados de la escorrentía media anual simulada en las 338 cuencas acumuladas de España. Los resultados ilustran el comportamiento del promedio de los 10 MRC. En general, para valores pequeños de la escorrentía se observa una mayor dispersión en los resultados. Esto es común tanto para la escorrentía directa de los MRC, como para la escorrentía calculada por las cinco fórmulas climatológicas. A medida que la escorrentía es mayor la dispersión disminuye. Un análisis cualitativo de los gráficos no nos permite valorar adecuadamente el comportamiento de las diferentes alternativas, por lo que, se llevó a cabo una evaluación cuantitativa.

Figura 3 Escorrentía media anual observada versus simulada en las 338 cuencas acumuladas de España para el promedio de los 10 MRC: (a) Escorrentía directa, (b) Schreiber, (c) Ol'dekop, (d) Budyko, (e) Turc-Pike, (f) Zhang et al. y (g) UNH/GRDC.

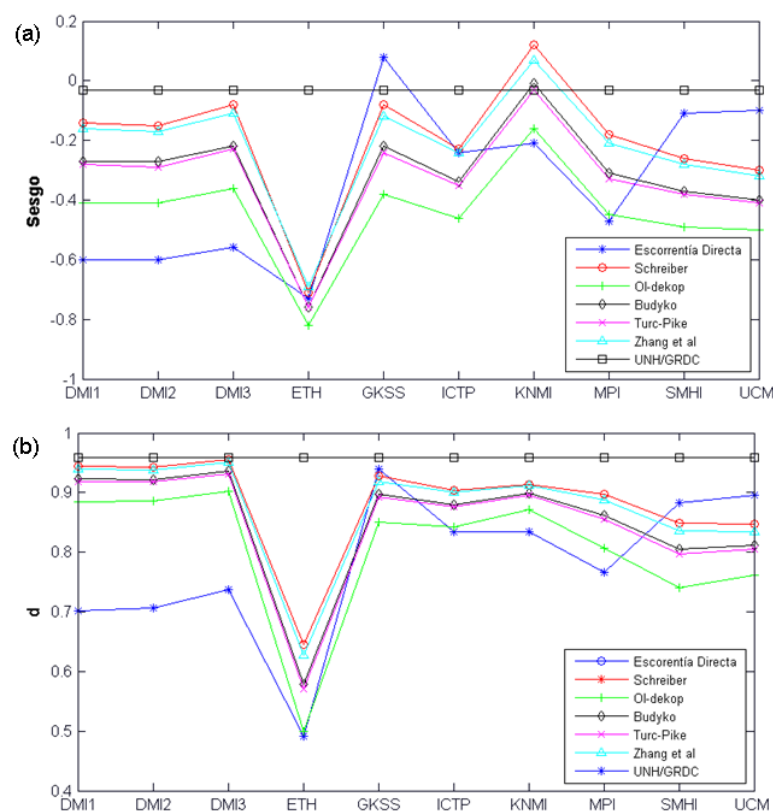


A través de los indicadores de capacidad de ajuste, se evaluó cuantitativamente la medida en la que las alternativas analizadas reproducen los valores observados. La Figura 4 compara la capacidad de ajuste de la escorrentía directa y las fórmulas de Schreiber, Ol'dekop, Budyko, Tur-Pike, Zhang et al. con respecto a los valores observados, a través del sesgo y d . Se comparan también con la UNH/GRDC. Según la Figura 4 (a) y (b), los indicadores de la UNH/GRDC muestran un comportamiento superior al obtenido por las alternativas

analizados con un sesgo de -3% y un valor de d de 0.959. El comportamiento de las cinco fórmulas climatológicas para el promedio de los 10 MRC es mejor que el obtenido por la escorrentía directa. La fórmula propuesta por Schreiber destaca sobre el resto de formas funcionales para todos los MRC. La fórmula de Zhang et al. da resultados similares aunque ligeramente inferiores a los obtenidos por Schreiber. La fórmula de Budyko y Turc-Pike tienen resultados parecidos y la fórmula de Ol'dekop es la que menor capacidad de ajuste presenta. La escorrentía directa presenta los resultados más desfavorables para el promedio de los 10 MRC, sin embargo, destaca el comportamiento de los modelos GKSS, SMHI y UCM, cuya bondad de ajuste es superior a la obtenida por la fórmula de Schreiber. Para el promedio de los 10 MRC el sesgo en la escorrentía directa es de -35% y en la fórmula de Schreiber de -20%, por lo que al utilizar la fórmula de Schreiber antes que la escorrentía directa, el error en los resultados se disminuye en un 15%. Del conjunto de las 10 simulaciones de los MRC, algunos proporcionan mejores resultados que otros. Para la fórmula de Schreiber, el modelo DMI.3 muestra los mejores resultados, con valores del sesgo y d de -8% y 0.955 respectivamente. En lo que respecta a la escorrentía directa, sobresale el modelo GKSS que tiene un sesgo de 8% y un valor de d de 0.940. Todas las alternativas coinciden en que el modelo ETH presenta el mayor error al momento de reproducir la escorrentía observada en las cuencas españolas.

Por tanto, la fórmula de Schreiber y el modelo DMI.3 es la alternativa que minimiza el sesgo con respecto a los valores observados. Al compararla con la UNH/GRDC la diferencia en sus resultados es del orden del 5%.

Figura 4 (a) Sesgo y (b) índice de ajuste(d) de la escorrentía directa, las cinco fórmulas climatológicas y la UNH/GRDC con respecto a los valores observados.



Se validaron los resultados obtenidos en la Figura 4, mediante la determinación de la bondad de ajuste de las alternativas analizadas con respecto a la UNH/GRDC. En este caso, también se determinó que la fórmula de Schreiber estima mejor los valores de escorrentía media anual que la escorrentía directa de los MRC. Para el promedio de los 10 MRC, el sesgo en la fórmula de Schreiber es de -18% y el índice de ajuste de 0.925. El resultado más desfavorable es para el promedio de las 10 simulaciones de escorrentía directa con un valor del sesgo de -34% y d 0.845. En este caso al emplear una fórmula de Schreiber antes que la escorrentía directa, el error en los resultados se disminuye en un 16%. La fórmula de Schreiber y el modelo DMI.3 dan la mejor aproximación a los datos de la UNH/GRDC con un valor del sesgo de -5% y d 0.972.

5 Discusión y conclusiones

Este estudio compara diferentes alternativas para generar series de escorrentía representativas de la situación actual, cuando no se dispone de un modelo hidrológico correctamente calibrado. Se utilizan 10 simulaciones de escorrentía directa del proyecto PRUDENCE y cinco fórmulas climatológicas basadas en el índice de aridez, en condiciones de clima actual (periodo 1961-1990). Los resultados se comparan con los valores de escorrentía natural estimados por el modelo hidrológico SIMPA y se validan con las capas de escorrentía de la UNH/GRDC que es un producto orientado específicamente a la escorrentía y con la misma resolución que los MRC.

El estudio se ha llevado a cabo en 338 cuencas acumuladas que cubren la totalidad del territorio continental de España. La bondad de ajuste de la UNH/GRDC con respecto a los valores observados, proporciona valores superiores a los obtenidos por las fórmulas climatológicas y la escorrentía directa simulada por los MRC, con una desviación de -3% y un valor del índice de ajuste de 0.959, esto confirma el hecho de que es la mejor representación de la escorrentía actual a escala de grandes extensiones. De las alternativas analizadas, las formas funcionales basadas en el índice de aridez dan mejores resultados que los obtenidos por la escorrentía directa. Teniendo en cuenta que las fórmulas climatológicas utilizan las variables precipitación y temperatura para estimar los valores de escorrentía media anual, es de esperarse que los valores obtenidos por las fórmulas climatológicas den mejores resultados que los obtenidos por la escorrentía directa debido a que las incertidumbres asociadas a las simulaciones de los modelos de clima se caracterizan por presentar menor sesgo para precipitación y temperatura que para escorrentía. De las cinco formas funcionales, la fórmula propuesta por Schreiber muestra los mejores resultados y muestra una desviación del -20% para el promedio de los 10 MRC. Los resultados más desfavorables son para la escorrentía directa con una desviación del -35% para el promedio de los 10 MRC. La capacidad de ajuste varía de un modelo climático a otro, así para la fórmula de Schreiber el que proporciona la mayor aproximación a los valores observados es el modelo DMI.3 con una desviación de -8 %. Al utilizar la fórmula de Schreiber antes que la escorrentía directa simulada por los MRC, el error en la desviación para el promedio de los 10 MRC, se disminuye en un 15%. La comparación de las alternativas analizadas con respecto a la UNH/GRDC también destaca el mejor comportamiento para la fórmula de Schreiber y el modelo DMI.3. En este caso, la desviación con respecto a la UNH/GRDC es del 5%.

La fórmula de Schreiber y el modelo DMI.3 proporcionan valores de escorrentía media anual que más se aproxima a los valores observados y a los valores de referencia de la UNH/GRDC para ámbitos de estudio a gran escala, sin embargo, no pueden utilizarse directamente para la evaluación y gestión de los recursos hídricos, ya que para ello se requiere disponer de series mensuales para el periodo analizado. De igual manera, las series mensuales de escorrentía directa simuladas por los MRC no pueden utilizarse directamente para la gestión de los recursos debido a que no generan resultados representativos de la situación actual. Teniendo en cuenta esto, una opción para generar supuestos razonables de escorrentía observada, sobre las cuales se puedan construir series de diseño que introducidas en los modelos de gestión nos permitan evaluar el impacto sobre los recursos de agua, consiste en utilizar los valores medios de escorrentía anual calculados por la fórmula de Schreiber y el modelo DMI.3 para obtener factores multiplicativos constantes que nos permitan corregir las series mensuales de escorrentía directa simulada por los MRC.

6 Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico prestado por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino de España a través del proyecto 200800050084350 Vulnerabilidad, impactos y adaptación al cambio climático: Estudio integrado sobre la agricultura, recursos hídricos y costas (ARCO) y de la Unión Europea mediante el contrato nº 036961 CIRCE - Climate Change and Impact Research: the Mediterranean Environment. Al Ministerio de Asuntos Exteriores y Cooperación, y la Agencia Española de Cooperación Internacional (MAEC-AECID), a través de sus becas para estudios de doctorado. Se han utilizado datos procedentes del proyecto PRUDENCE, financiado por la Unión Europea mediante el contrato EVK2-CT2001-00132.

7 Referencias

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Roma. <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/>; <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490EII.htm>.

Arora, V.K., 2002. The use of the aridity index to assess climate Change effect on annual runoff. *J. of Hydrology* 265: 164-177.

Budyko M.I., 1948. Evaporation under natural conditions, Gidrometeorizdat, Leningrad, English translation by IPST, Jerusalem.

CEDEX, 1998. Metodologías de Evaluación de los Sistemas de Explotación de Recursos Hídricos.

Christensen, J.H., Boberg, F., Christensen, O.B. y Lucas-Picher, P., 2008. On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L20 709, doi: 10.1029/2008GL035694, 7864.

Döll, P., Kaspar, F., Alcamo, J., 1999. Computation of global water availability and water use at the scale of large drainage basins. *Mathematische Geologie* 4, 111-118.

Estrela, T., Quintas, L., 1996. El sistema integrado de modelización precipitación esorrentía (SIMPA). *Revista de Ingeniería Civil*, N° 104, 43-52. CEDEX Ministerio de Fomento.

Fekete, B.M., Vörösmarty, C.J., Grabs, W., 2000. Global, Composite Runoff Fields Based on Observed River Discharge and Simulated Water Balances. Rep. 22, Global Runoff data Cent., Koblenz, Germany. Web: <http://www.grdc.sr.unh.edu/html/paper/ReportUS.pdf>.

González Zeas, D.P., 2010. Análisis hidrológico de los escenarios de cambio climático en España. UPM.

IPCC, 2001. Tercer informe de evaluación. La base científica. Grupo I del Tercer Informe del Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

IPCC, 2007. Cambio Climático 2007. Informe de síntesis. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza.

Janssen, P.H.M., Heuberger, P.S.C., 1995. Calibration of process-oriented models. *Ecol. Modelling* 83:55-66.

Menzel, L., Burger, G., 2002. Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (southern Elbe, Germany). *J. Hydrol.* 267:53-64.

Muzik, I., 2002. A first-order analysis of the climate change effect on the flood frequencies in a sub-alpine watershed by means of a hydrological rainfall-runoff model. *J. Hydrol.* 267:65-73.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10, 282-290.

Ol'dekop E.M., 1911. On evaporation from the surface of river basins. *Trans. Met. Obs. Iur-evskogo, Univ. Tartu* 4 in Russian.

Pike, J.G., 1964. The estimation of annual runoff from meteorological data in a tropical climate. *J. Hydrol.* 2, 116-123.

PRUDENCE, 2001. Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects. Project EVK2-CT2001-00132 in the EU 5th Framework program for Energy, environment and sustainable development. Web: <http://prudence.dmi.dk/>.

Schreiber P. 1904. Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa. *Z. Meteorol.*, 21 (10), 441-452.

Turc, L., 1954. Le bilan d'eau des sols. Relation entre la precipitation, l'évaporation et l'écoulement. *Ann. Agron.* 5, 491-569.

Vörösmarty, C.J., Federer, C.A., Schloss, A., 1998. Potential evaporation functions compared on US watersheds: implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling. *J. Hydrol.* 207, 147-169.

Willmott, C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 63: 1309-1369.

Yates, D.N., 1997. Approaches to continental scale runoff for integrated assessment models. *Journal of Hydrology* 201:289-310.

Zhang, L., Daws W.R., Walker G.R., 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resour. Res.* 37 (3), 701-708.

Zhang, G.H., Fu, S.H., Fang, W.H., Imura, H., Zhang, X.C., 2007. Potential Effects of Climate Change on Runoff in the Yellow River Basin of China. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Vol.50(3):911-918.